

# Teknisk rapport

## Passasje for Fosenbrua

Gruppe 24



(1)

## Sammendrag:

Konseptet med rørbru eller "archimedes bridge" er ikke nytt. Mennesket har bygd bruer i flere hundre år, tunneller har også blitt sprengt ut under sjøbunnen (undersjøiske tunneller) eller blitt anlagt i sjøbunnen. På slutten av 1900 tallet ble det begynt å bygge flytebruer for å muliggjøre en mer kostnadseffektiv kryssing av lengre fjordstrek. Flytebruene har en utfordring når det kommer til friseilingshøyde, da høye flytende konstruksjoner kan få et stabilitetsproblem da de blir et stort vindfang. En akseptabel friseilingshøyde for Trondheimsfjorden på et 100års perspektiv anslår kystverket til å bli 150 meter. De største fartøyene per dags dato har et dypgående på 30 meter. Dette resulterer i at det vil være mer effektivt å bygge under, men i vannet.

En rørbru bør plasseres så dypt at de største fartøyene som benytter leden fritt kan seile over konstruksjonen uten fare for at de får et sammenstøt. Dette er også praktisk da en dybde på 30 meter vil gjøre at konstruksjonen ikke blir utsatt for bølgekrefter. Utfordringer med å bygge en rørbru vil blant annet være knyttet til oppdrift, fortøyning og rømning.

For å løse utfordringene med å lage en rørbru som del av et lengre brusamband for eksempel ved en kryssing av Trondheimsfjorden vil en måtte nytte gjøre mye av den tekniske kompetanse Norge har bygd opp gjennom on og offshore ingeniørkunst de siste 100 år.

Det er enda ikke fullført en rørbruutbygging, de er blitt prosjektert løst på ulike måter. En rørbrupassasje over Trondheimsfjorden vil være et "signalbygg" som nok en gang setter norsk ingeniørkunst på verdens kartet og vise at vår industri er innovativ og løser utfordringer på en framtidsrettet måte.

# Innholdsfortegnelse

Sammendrag:.....	2
0 Forprosjekt.....	5
0.1 Innledende.....	5
0.2 Behovsanalyse.....	6
0.2.1 Fartøy til vanns .....	6
0.2.2 Biltrafikk.....	6
0.2.2.1 Forbikjøringsfelt .....	<b>Feil! Bokmerke ikke definert.</b>
0.2.3 Kø og trafikkflyt .....	7
0.2.4 Bevaring av fjorden.....	7
0.2.5 Økonomiske og tekniske krav.....	7
0.2.6 Myke trafikanter.....	7
0.3 Ulike løsninger for passasje.....	8
0.3.1 Tradisjonelle broer:.....	8
Buebro:.....	8
Bjelkebru:.....	9
Fagverksbru.....	9
Platebro: .....	9
Kassebro: Brokroppen er sammensatt av kasseprofiler.....	10
Hengebru: Kjørebanelen er opphengt i wire. Det er bygd hengebruer med hovedspenn på 1991m og total lengde på 3911 meter.....	10
Hvordan passere en tradisjonell bru?.....	11
0.3.2 Undersjøisk tunnel.....	12
0.3.3 Kombinasjonsbruer.....	14
0.3.4 Flytebro med høybro midtfjords .....	15
0.3.5 Flytebro med friseilingshøyde ved den ene ilandføringen.....	15
0.3.3.....	16
0.3.6 Kombinasjon flytebro-rørbru .....	17
0.3.7 Flytebro med slusepassasje.....	18
0.3.8 Åpne lukke passasje.....	20
1 Konsept.....	21
1.1 Innledning.....	21
1.2 Konstruksjonen.....	22
1.2.2 Bredder, dybder, lengder.....	22

1.3	Trafikk.....	24
1.3	Ventilasjon i tunnelen .....	25
1.4	Naturinngrep .....	26
1.5	Materialer .....	27
1.6	Kostnader .....	28
1.7	Laster .....	29
1.9	Kombinert vind og bølgeavskjerming.....	32
1.9.1	Autonombåt.....	32
	Røret.....	33
	Skjøter mellom rør elementene.....	36
1.10.1	Utforming av rør tverrsnittet. ....	38
1.10.4.1	Sugeanker .....	45
1.10.4.2	Kunstig sjøbunn.....	47
2.0	Kilder .....	52

## 0 Forprosjekt

### 0.1 Innledende

Det skal prosjekteres en bro med passasjedel som skal binde Trondheim og fosen sammen. Passasjen skal ta hensyn til at store olje- og gasskonstruksjoner skal kunne passere, i likhet med den vanlige skips- og småbåtstrafikken fjorden har. Fra før av går det en ferje over dette området, denne går mellom Flakk og Rørvik og er beregnet for både biler og mennesker.

#### Fjorden

På det aktuelle punktet er fjorden 557 m bred. Det er med andre ord en lang strekning det skal bygges bro over og dette er i seg selv en betydelig utfordring. Den neste store geografiske utfordringen er dybden på fjorden. Den er som en undersjøisk U-dal med 508 meter på det dypeste. Kombinasjonen av lang strekning og stort dyp danner grunnlaget for avgjørelsene gruppen tar av løsning. På Trondheimssiden er det en grunne kalt Flakkgalten hvor det kan være mulig å bygge festepunkter, dette er noe som tas opp igjen senere.

## 0.2 Behovsanalyse

### 0.2.1 Fartøy til vanns

Oppgaven ber om tilrettelegging for at olje- og gasskonstruksjoner skal kunne passere Fosenbroa. Dette er svært store konstruksjoner som både ligger dypt i vannet og høyt over vannflaten. Oppgaven tolkes naturlig dithen at de vanlige fartøyene som ferdes også skal få passere uten hindring, derav vanlig skipstrafikk og småbåter.

### 0.2.2 Biltrafikk

Broen skal dekke transportbehovet mellom fastlandet og Fosenhalvøya sett ut ifra et 50 års perspektiv. Å regne med at ÅDT og spesielt ÅDT-T vil øke, er aktuelt. Spesielt med tanke på utbygginger på Fosen-siden av fjorden. Å lage en broforbindelse vil antakelig gjøre området mer attraktivt for utbygging, da området vil være en forstad til Trondheim. Dette vil føre til økonomisk vekst for Trondheim generelt.

Største tillat bredde for kjøretøy på offentlig vei er 2,55 m. Finner ut at Volkswagen transporter som er en vanlig ambulansetype er cirka 2 meter bred. (2) Dermed trenger vi en veibredde som er minimum 4,55 meter bred inklusiv veiskulder. Dette gir oss grunnlag til at veien bør være nærmere 5 meter bred.

ÅDT blir satt til 6000 siden det virker realistisk med 200% økning fra 2060 etter at det er kommet bru over til flakk som forbinder Trondheim og fosenhalvøya sammen slik at det blir lettere å pendle dit daglig.

### 0.2.3 Kø og trafikkflyt

Det er, som nevnt, en stor målsetting at trafikken går uten forsinkelser eller kødannelser. Dette er gjeldende for både skipstrafikken og for biltrafikken. Gruppen anser det som avgjørende at biltrafikken over fjorden kan fungere kontinuerlig, selv når store skip og olje- og gasskonstruksjoner skal passere broen. Dagens ferjeforbindelse legger godt til rette for skipstrafikken, men skaper dårlig flyt for biltrafikken.

### 0.2.4 Bevaring av fjorden

Norges fjorder er en stor del av landets naturarv og dermed sentralt å bevare. En massiv bro vil kunne skille seg svært mye ut i naturbildet og dermed ødelegge fjordens profil. Samtidig skal det bygges noe som kan fungere godt i praksis og fergen som allerede brukes her kan påstås å ikke være tilstrekkelig for dette formålet.

### 0.2.5 Økonomiske og tekniske krav

Det stilles krav til at prosjektet skal være økonomisk og ingeniørfaglig gjennomførbart. Av denne grunn vil det prosjekteres etter norsk standard.

### 0.2.6 Myke trafikanter

Det legges til grunn tidlig i forprosjektet at trafikanter skal kunne ferdes trygt over fjorden. Fergen som finnes er et godt eksempel på trygg ferdsel. Ved en broprosjektering skal de myke trafikantene tas hensyn til, slik at de som ønsker skal kunne komme seg over fjorden uten bruk av bil/buss.

### 0.3 Ulike løsninger for passasje

En fjord kan krysses på mange måter. Ved å ta utgangspunkt i de geografiske forholdene i fjorden blir det raskt tydelig at en tradisjonell brobyggingskunst vil komme til kort, dette spesielt på grunn av de store dybdene. I for eksempel Kina bygges ekstremt lange broer med hell, der er det derimot grunnere og derfor er dette mulig. Ved en dybde på opptil 500 meter kan det antas at pilarer ikke vil være en god løsning. Ut ifra idémyldring er det kommet frem til at en flytebro er det som må prosjekteres. Da en annen gruppe har fått i oppgave å prosjektere selve broen, er dette noe som må tas hensyn til i prosjekteringen av passasjedelen.

#### 0.3.1 Tradisjonelle broer:

Buebro: Har en bærende bue og kjørebanelene plasseres delvis inni, over eller under brobuen.

Eksemper: Nye svinesundbrua

Fordeler:

Enkelt konstruksjonsprinsipp.

I egnet terreng lett å plassere.

Mulighet for brei friseilingslei.



Bilde 1: Svinesundbru

Ulemper:

Lange bruspenn.

Dyr konstruksjon over lange strekk



Bilde 2: Buebro over vei



Bjelkebru: Den enkleste formen for bru. En fritt opplagt bjelke med understøttelse.

Fordeler: Enkel byggemetode

Ulemper: Lange bruspenn → høyt antall pillarer  
Trondheimsfjorden er bred og dyp.  
Veldig høye pillarer og lange spenn for å få til friseiling.



Bilde 3: Bjelkebru over vei.

Fagverksbru: Mulig gjøre lenger bruspenn. Godt kjent metode.

Fordeler: Sterke og slanke konstruksjoner,  
Ulemper: Totalspennet over trondheimsfjorden blir veldig langt. Volumet på fagverket vil bli ekstremt og egenvekten for høy?



Bilde 4: Fagverksbru

Platebro: En bru med plater som er understøttet av pillarer.

Fordeler: Enkle prisipper

Ulemper: Trondheimsfjorden er dyp, ekstremt lange pillarer.



Bilde 5: Platebro

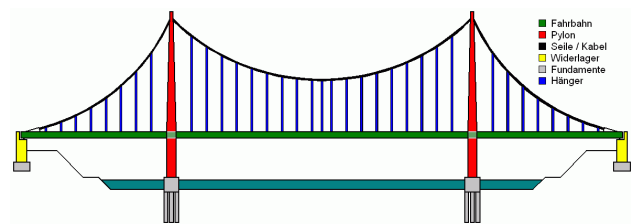
Kassebro: Brokroppen er sammensatt av kasseprofiler.  
 Fordeler: Torsjonssterk konstruksjon.

Ulemper: Må stå på pillarer. Trondheimsfjorden er dyp.



Bilde 6: Kassebro

Hengebru: Kjørebanelen er opphengt i wire.  
 Det er bygd hengebruer med hovedspenn på 1991m og totallengde på 3911meter.  
 Fordeler: Tradisjonelt lange bruspenn.

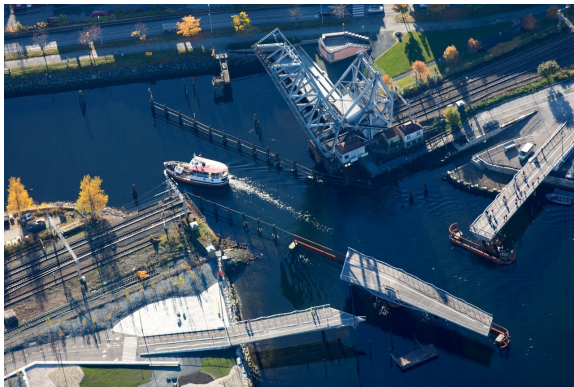


Bilde 7: Hengebru

Alle de tradisjonelle formene for brobygging vil komme til kort når det skal bygges en bro over Trondheimsfjorden på stedet fra Flakk til Rørvik. Bredden på fjorden er ca 7500m og dybden er over 500meter. Det lange spennet kombinert med dybden vanskeliggjør byggingen av tradisjonelle bruer. Knekk lengden på pilarene vil bli lange og egenvekten vil bli høy. Bruspennene vil også måtte bli lange som også øker vindfang og egenvekt på grunn av krav til stivhet på konstruksjonen. Det er innlysende at nytenking og moderne byggemåter og kombinasjon av disse må til.

## Hvordan passere en tradisjonell bru?

For å passere en normal bru passerer vi enten under brubanen. For bruer som har hatt for lav friseilinghøyde har vi bygd ulike mekaniske løsninger for å løfte eller flytte brubanen og åpne opp leia. I eller i nærheten av midtbyen i Trondheim har vi flere eksempler på hvordan dette kan gjøres.



*Bilde 2: Skansen bruene. Jernbanebrua er en klaffebri, gangbrua er en svingbru.*



*Bilde 5: Verftsbrua fra midtbyen over til solsiden er en rullebri. Brudekket ruller tilbake under dekket på midtbyen.*



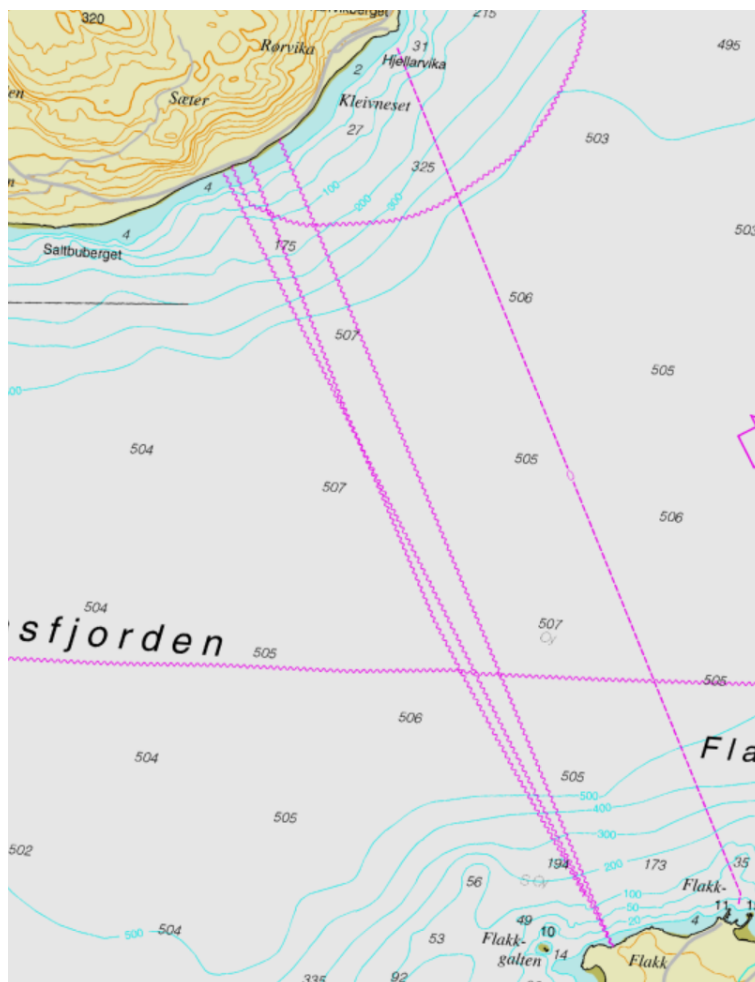
*Bilde 6: Steel Bridge i portland er en hevebri.*



*Bilde 7: Hörnbridge i Kiel er en foldebri.*

### 0.3.2 Undersjøisk tunnel

Tunnelen er nødt til å være minimum 557 meter dyp siden det er krav at det skal være 50 meter fjell mellom tunnel og sjøbunn. Bunnen på fjorden er 507 og antar da at det er fjell rett under fjordbunnen. Stigningen i tunnelen kan ikke overstige 7% siden trafikken er over 1500 ÅDT og dermed ikke kategoriseres som lavtrafikkveg. (Det antas også at trafikken vil øke ved en tunnelbygging). Dermed må tunnelen være veldig lang for at stigningskravene skal være oppfylt. Derfor tenker vi at det kan være naturlig å koble denne tunnelen på steinbergtunnelen og starte nedstigningen derfra slik at den ikke overstiger tillatt stigning.



Bilde 8

Ulemper med denne tunnelen er at det aldri er bygget en så dypt undersjøisk tunnel før. Det er veldig store stigninger helt i starten og slutten siden fjorden er formet som en u.

Tunnelen blir veldig lang for å fylle stigningskravene og dermed veldig dyr. Det er stor brannfare.

Fordeler er at det aldri er blitt bygget en så dyp tunnel før så det vil være veldig stor prestisje å bygge den. Den vil være skjermet for vær og vind.

### 0.3.3 Kombinasjonsbruer

For å feste fosen til trondheimsiden samtidig som at alle fartøyer som nytter fjorden skal kunne passere må vi kombinere flere måter å tenke bru på.

Vi ser for oss at basisen for brua vår blir en flytebru og kombinere denne med mer klassiske bruløsninger med mekaniske åpningsmekanismer eller en rørtunnel som flyter i sjøen.



*Bilde 9: Prosjekt bilde av kryssing av trondheimsfjorden med flytebru og rørtunnel.*



*Bilde 10: Nordhordalandsbrua, kombinasjon av hengebru og flytebru.*

### 0.3.4 Flytebro med høybro midtfjords

Multiconsult skisserer i et frokostmøte 17.06.2014 (3) en løsning der en flytebro hvilende på pongtonger bygges opp til en høyere bro med en friseilingshøyde stor nok til at aktuell trafikk kan passere under. Konstruksjonen er planlagt av LMG Marin (4) med en brobue som går fra pongtongen og over kjørebanelen. Denne er avstivet med en fagverksbjelke under vann. Prisestimat fra LMG Marin er 1 million pr løpemeter med bro, dette er beregnet for en bro fra Anda til Lote med et spenn på tilsammen 2km. Med et spenn på 7km må det mest sannsynlig gjøres tilpasninger.



Bilde 11

#### Fordeler:

- Lavere vindprofil
- Lav egenvekt
- Lager ikke tvangskrefter i konstruksjonen
- Kjent teknologi

#### Ulemper:

- Stor visuell profil
- Lang og høy veioppbygging for å nå god nok høyde

### 0.3.5 Flytebro med friseilingshøyde ved den ene ilandføringen.

Det kan prosjekteres en flytebro med oppbygging mot den ene siden av fjorden, slik at pilarer kan brukes. Dette er en metode som allerede er bygget (Nordhordalandsbroa).

Teknologien kan derfor hevdes å være utprøvd tilstrekkelig. Utfordringer med friseilingsleien vil her løses med at en tradisjonell brokonstruksjon står plassert på pilarer på havbunnen eller, for Flakk – Rørvik sin del, plassert på Flakkgalten og kvote minus 50, ca. 700m fra land. Dette er fri brospenn som kan løses på mange måter, enten ved bruk hengebro (5) eller buebro (6). En slik løsning vil i stor grad påvirke skipstrafikk i leien inn mot Trondheim, da all skipstrafikk tvinges over på én side av fjorden. Det visuelle inntrykket vil også bli kraftigere på den siden av fjorden der leien



Bilde 12

blir lagt. Dette vil bryte sterkt med det flate jordbrukslandskapet som går ned mot Trondheimsfjorden på flakk.

**Fordeler:**

- Lavere vindprofil
- Kjente konstruksjonsmetoder
- Det har blitt bygget liknende broer

**Ulemper:**

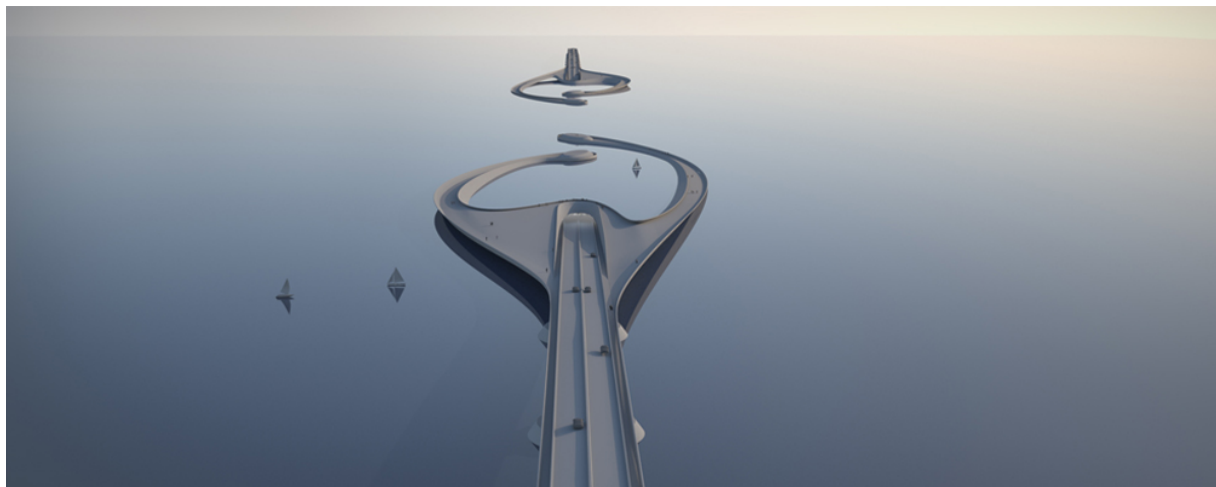
0.3.3

- Legger føringer på at leien må ligg nærme land
- Høy visuell profil



### 0.3.6 Kombinasjon flytebro-rørbro

De siste årene er det blitt prosjektert flere flytende rørtunneler i Norge. Så langt har ingen av disse blitt bygget. I prosjektet for å få en fergefri E39 på Vestlandet har Statens Vegvesen sett seg ut 4 strekninger de mener er høyst aktuelle for rørbro (7). ÅF Infrastruktur (tidligere REINERTSEN) mener at teknologien som finnes i dag er moden for å realiseres (7). En rørbro trenger ikke å ha mer enn 20 meter klaring under vannflaten for at selv verdens største lasteskip skal kunne passere. (9) Til sammenligning trengs en friseilingshøyde på 70 meter ved en bro som bygges i høyden. (8) Dermed blir den totale lengden på passasjen mye lavere ved valg av rørbro enn ved for eksempel buebro, da det også skal tas hensyn til en maksimal helning på 5 grader (6). Rørbroer har blitt plassert midt på eller ved ilandføringen på ulike forprosjekter (7) (8), dette gir en frihet til å plassere seilingsleien der det er mest hensiktsmessig. Den visuelle profilen til en rørbro vil være mindre prangende (spesielt høydemessig), men samtidig spektakulær.



Bilde 13

Fordeler:

- Lavere visuell profil
- Smalere konstruksjon
- Kravet til dybde er lavere enn kravet til høyde ved konvensjonell bro
- Mulighet for være pionér om den bygges.

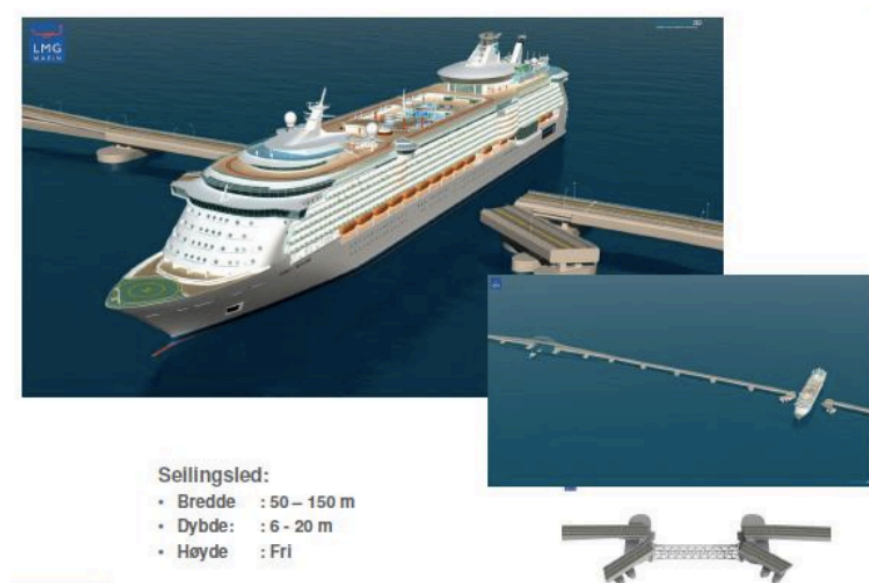
Ulemper:

- Ikke bygget før
- Uavklarte prosjekteringskostnader
- Uavklart standhaftighet mot bølger og strøm over tid

### 0.3.7 Flytebro med slusepassasje

Det kan velges en løsning der passasjen løses med sluser. Det kan her enten være heveklaffer eller sluser som roteres horisontalt. Førstnevnte er en relativt vanlig løsning for elver ved for eksempel byer og andre biltrafikkerte steder hvor store laster skal fraktes med skip, for eksempel Tower Bridge i London. Løsningen er godt utprøvd for broer av klassisk oppbygging (Les: bygget på pilarer), men lite for flytebroer. Løsningen med sluser som åpnes horisontalt er derimot skissert i blant annet (3) hvor det skal muliggjøres for cruiseskip å passere.

Av de to typene slusepassasjer, vil løsningen med sideveis roterende sluser være mest aktuelt og gruppen går derfor dypere inn i denne løsningen. Passasjen kan støttes opp av et fagverk under, slik at stivhet i konstruksjonen opprettholdes når slusene er åpne. Selve dybden til fagverket villet måtte være like stor som ved rørbro, men lengden liggende under vann ville vært mindre. Passasjens åpning må uansett være på 300meter totalt. Rørbroen trenger en stigning på maks 5% og trenger lengde for å oppnå stigningen.



Bilde 14

Denne løsningen ville krevd lignende fundamentering som en rørtunnel, med sugeankere for å unngå torsjon. Pongtonger måtte muligens også vært brukt for å holde de 300 meterne med fagverk flytende under åpning av slusene.

I behovsanalysen kom det frem at gruppen anså konstant flyt av trafikk på sjøen og på veien som et viktig mål. En passasje med sluseløsning vil ikke gi dette, da åpne-lukke-mekanismen vil stoppe biltrafikken når skip høyere enn 10 meter skal passere. Et annet punkt er tiden det vil ta å åpne slusene. Dersom åpningen skal oppnås til å være 300 meter totalt, vil det trengs to sluser på 150 meter per stykk. Det antas at tiden det vil ta for å åpne disse vil være betydelig. Dette er et sentralt poeng, da blant annet hurtigruten har avgang to ganger daglig fra Trondheim (7). Det ville vært uforsvarlig å stenge broen både klokken 10 og klokken 12 hver dag. Selv om disse tidspunktene ikke er midt i morgenrushet, vil trafikken måtte stoppes lenge hver dag og dette fører til svært dårlig fremkommelighet.

### 0.3.8 Åpne-lukke passasje

Det har blitt sett på en løsning for åpne-lukke bro som løsning for passasje for Fosenbrua. I den forbindelse er det kommet frem til at dette ikke er et aktuelt konsept å gå for Fosenbrua. Grunnen til dette er at det ikke er sikkert at det vil bli plass nok til passering av alle de store olje- og gasskonstruksjonene som verdal verft produserer. Det vil også bli stopp i all biltrafikk på brua når den må åpnes for større båttrafikk. Dersom det blir den billigste flytebroen vil ikke engang den daglige trafikken kunne passere under brua, den må dermed åpnes og lukkes ofte og det blir dårlig flyt i trafikken både på land og i vann. Med grunnlag i dette er det ikke hensiktsmessig å bygge en slik bru siden den ikke vil være samfunnsnyttig og ikke oppnå behovene som er satt.

# 1 Konsept

## 1.1 Innledning

Konseptet for løsning av passasje i forbindelse med Fosenbroa er bestemt til å bli flytebro med rørbro i passasjedelen. Det er mange viktige årsaker til at det er valgt å la trafikken gå under vann i passasjedelen. Ved å kombinere en flytebroløsning som tar utgangspunkt i eldre prinsipptegninger fra 1940-tallet og kombinere dette med noe nyvinnende som en rørbro-passasje, blir prosjektet helt unikt. Det blir en lavtliggende løsning som bevarer fjordens utseende i størst grad mulig.

Visjon:

Visjonen vi har er å kunne passere trondhemfjorden ved fri ferdsel. Passasjen skal ikke bryte med landskapet og alle fartøy skal kunne passere.

Idé:

I henhold til oppgaveteksten tenkes det å utarbeide en kryssing av fjorden som legger til rette for at alle fartøy skal kunne passere. Det må tas hensyn til både myke og harde trafikanter på sjøen, slik at det blir trygg ferdsel for alle. Per dags dato går krysningen av Trondheimsfjorden ved ferjesambandet Flakk-Rørvik, og vi tar utgangspunkt i at krysningsforslaget vi utarbeider erstatter ferja over samme strekning. I prosessen videre blir det tatt hensyn til flere faktorer, først og fremst sikkerhet med hensyn til brann, vær og vind. I tillegg vil økonomiske forhold, og nytinking bli lagt vekt på.

Ønsket vårt er å legge til rette for at Verdal verft skal kunne utvikle og opprettholde sin virksomhet. Samt godstransporten er en viktig post for Trondheim som også må legges til rette for. Lokal arbeidskraft ønskes å bevares, og valget av krysning skal ikke hindre utvikling og produksjon. Gruppen har diskutert flere alternativer til løsninger, og vi er fremdeles i en utviklingsprosess med tanke på valg av løsning.

## 1.2 Konstruksjonen

Rørbroen vil bestå av to separate rør for hver kjøreretning på broen. Dette anses som en sikker løsning og vil føre til ingen møtekollisjoner. Statens Vegvesen har laget et oversikt over ulykker i tunneler. En ser ut ifra tabellen at den vanligste ulykken er front-til-front-kollisjoner. Dette gir flest drepte. Ved å unngå denne typen kollisjoner fullstendig, har konseptet en god sikkerhetsprofil for trafikantene. De to rørene

<b>ULYKKER I TUNNEL 2003-2012, KATEGORI</b>		
<b>Uhellskode hovedkategori</b>	<b>Drept</b>	<b>Hardt skadde</b>
0-9 Andre uhell	0	6
10-19 Samme kjøreretning	8	19
20-29 Motsatt kjøreretning	37	76
30-69 Kryssende kjøreretning	0	0
70-89 Fotgjenger innblandet	1	2
90-99 Utforkjøring	25	48

Bilde 15

### 1.2.2 Bredder, dybder, lengder

Tallene brukt til bestemmelser av bredder og dybder er først og fremst hentet fra kontakt med Verdal Verft og kystverket i Trondheim. I samtaler med Verdal Verft fremkommer det at de største konstruksjonene som er sannsynlig å bli fraktet i fjorden har bredde på 124m og dybde på opptil 27m under havflaten. Dette er kritiske tall for prosjektet og brukes videre til bestemmelsen av dimensjoner. Fra kommunikasjon med kystverket er det ønsket å ha friseilingsbredde på 300 meter totalt, altså to sider med 150 meter bredde.

Det blir bestemt at total dybde fra havoverflate og ned til toppen av rørtunnelen skal være 30 meter. Det blir her en klaring på 3 meter for de aller største konstruksjonene. Bredder for hver av de to seilingsleiene blir 150 meter. Mellom disse to skal retningslys

sørge for at trafikken går rett vei. Det blir altså 300 meter hvor dybden er 30 meter under havflaten. I tillegg blir det en oppbygging på ca. 600 meter på hver side for å oppnå maksimum stigning på 5%, som er anbefalt fra Statens Vegvesen. (10) ILLUSTRASJON. Broen har en høyde på 10 meter over havflaten, nedbyggingen må derfor bli totalt 40 meter.

Pioneering Spirit er den største typen fraktefartøy som eksisterer. Denne brukes av Verdal Verft og de røde tallene under (hentet fra mailutveksling) angir maksimumsverdiene.

**Pioneering Spirit:** <http://allseas.com/equipment/pioneering-spirit/>

*Vessel specifications*

Length overall (incl. stinger) 477 m (1,565 ft)

Length overall (excl. stinger) 382 m (1,253 ft)

Length between perpendiculars 370 m (1,214 ft)

**Breadth: 124 m (407 ft)**

Depth to main deck 30 m (98 ft)

Slot length 122 m (400 ft)

Slot width 59 m (194 ft)

Topsides lift capacity 48,000 t

Jacket lift capacity 25,000 t

**Operating draught: 27 m**



Bildet 16

### 1.3 Trafikk

Det er ønsket at trafikken, både til vanns og til lands, skal kunne gå uhemmet over fjorden til enhver tid. Dette kunne enten løses ved å lage en passasje som fartøy kunne gå under eller over. At trafikken får gå sin gang vil føre til mindre køer og venting for både reisende og viktig varetransport. Den økte fremkommeligheten er dermed samfunnsnyttig.



Bilde 17

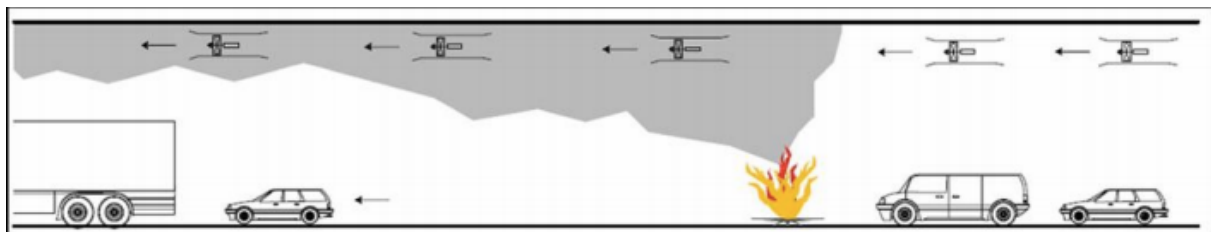


### 1.3 Ventilasjon i tunnelen

Følgende krav har gruppen valgt å ta hensyn til:

- *"Tunneler med enveistrafikk og tilhørende ramper skal ventileres i samme retning som trafikken både i en driftssituasjon og ved brann. I tunneler som har to løp og enveistrafikk skal ventilasjonsanlegget ved brann styres slik at røyken ikke trekkes inn i det løpet som brukes til rømning."*
- *"Ventilasjonsanlegg skal installeres i tunneler med lengde over 1000 m når ÅDT er > 1000. Ventilasjonsanlegget skal dimensjoneres for brann og for beregnet forurensningsnivå 10 år etter åpningsåret (ÅDT(10)). Luftkvaliteten skal overvåkes med måleutstyr for CO og måleutstyr for NO<sub>2</sub> (eller NO)"(14)*

Dette tolkes dithen at i dette prosjektet skal ventilasjonen for begge løpene ventileres i kjøreretningen for hvert rør. Ventilasjonsanlegget skal ved brann styres slik at røyken ikke trekker inn i rømningsløpet. Dette rømningsløpet er fellesrømning for begge de trafikkerte løpene. Rømningsvei skal ventileres med friskluft slik at det er trygt for mennesker å oppholde seg der under rømning.



Bilde 18

## 1.4 Naturinngrep

Det er tidligere blitt diskutert mange ulike løsninger for passasjen. Ved å velge en bro der fartøy skal passere under, må konstruksjonens størrelse være betraktelig større enn en passasje der fartøy kan passere over. Bakgrunnen for dette ses i måten et flytende fartøy ligger i vannet. De har som regel større høyde enn dybde under vannflaten. Ved å velge en broløsning som dykker ned i vannet, blir den totale konstruksjonen av betydelig mindre størrelse. Dette har mye å si for broas visuelle profil og blir et tilnærmet ubetydelig inngrep i fjorden.

## 1.5 Materialer

En rørbro-løsning antas å mindre materialkrevende enn en bro med opphøyd passasje på grunn av høyde-dybde-forhold, slik nevnt i forrige avsnitt. Fremtiden skal helst være grønn og det er dermed viktig å være kritisk om ulike løsnings materialbruk. Det er mulig det vil gå med mye materiale til rørbro-løsningen, spesielt siden den må være tett og bestå av mye betong, men på bakgrunn av en mindre nødvendig oppbygging antas det likevel en lavere total materialbruk.

Røret vil bestå av betong, da dette er et materiale som tåler vann godt. Pongtongene som skal holde rørbroen flytende, vil også bestå av betong.

## 1.6 Kostnader

Det er vanskelig å si noe om kostnadene knyttet til dette prosjektet. Det er en løsning som er lite utprøvd og som kun er på prosjekteringsstadiet. Det går sannsynligvis an å gjøre et overslag av kostnader, men det er uvisst hva slags problemer som kan oppstå i slike uutprøvede prosjekter. Her ligger det sannsynligvis mye uforutsette kostnader. I en mail utveksling med ÅF Reinertsen viser de til at overslagene på prosjektene som er gjort for statensvegvesen ikke er offentlig gjort. De valgte å kommentere at et anslag på mellom 1 og 2 millioner kroner pr meter med vei var veldig lavt. En normal flytebru som spenner over kortere fjordstrek har blitt bygd for ca 1 million kroner pr meter. Gruppen er ikke kvalifisert til å komme med et prisoverslag for rørbrua.

## 1.7 Laster

### 13.12.2 Egenlaster

#### 13.12.2.1 Generelt

Egenlast består av tyngde av brukonstruksjon og utstyr, belegning samt eventuell oppdrift som er permanent eller har en langsom variasjon i den dimensjonerende brukstid. Det skal regnes med øvre og nedre grense for last på grunn av tyngde.

Ved beregning av egenlast skal virkning av eventuell vannabsorpsjon i materialer som for eksempel betong, marin begroing og støvansamling, tas hensyn til.

Usikkerhet i tyngde skal delvis kunne reduseres ved måling av tyngde og justering av fast ballast under bygging. For egenlast for rørbruer vises det til 13.12.4 og 13.12.5.

#### 13.12.2.2 Permanent oppdrift

Brutto permanent oppdrift  $B_1$  bestemmes i forhold til middelvann (MV) for ferdig installert konstruksjon.

Brutto permanent oppdrift er resultanten av vanntrykket på konstruksjonens ytterflater. Beregnet oppdrift skal baseres på ytre geometri og vannets tyngdetetthet.

Dimensjoneringen skal baseres på en øvre og en nedre grense for geometri og vannets tyngdetetthet. Avviket fra  $B_1$  betegnes  $\pm \Delta B_1$ .

Hvis ikke en annen og dokumentert verdi legges til grunn, skal vannets tyngdetetthet regnes til å være  $9,955 \text{ kN/m}^3 \pm 1 \%$ . Det skal benyttes ugunstigste verdi for den lastvirkning som undersøkes.

#### 13.12.2.3 Marin begroing

Marin begroing skal antas å kunne forekomme på konstruksjonsflater i og nær vann.

Hvis ikke andre og dokumenterte verdier legges til grunn, skal marin begroing antas som angitt i tabell 13.3.

Avstand fra vannlinjen	Tykkelse	Masse per m <sup>2</sup>	Neddykket tyngde per m <sup>2</sup>
+0,5 til -12 m	150 mm	200 kg/m <sup>2</sup>	468 N/m <sup>2</sup>
> 12 m	75 mm	100 kg/m <sup>2</sup>	234 N/m <sup>2</sup>

Tabell 13.3: Marin begroing

Oppdrift skal beregnes med referanse til ytre dimensjon av konstruksjonen uten tillegg for marin begroing.

#### 13.12.6 Oppdriftslegemer

Oppdriftslegemer skal seksjoneres for å redusere konsekvensene av utilsiktet vannfylling.

#### 13.12.7 Forankringssystem

Forankringssystemet skal utformes slik at det er mulig å skifte ut systemets enkelte elementer. Metode for slik utskifting skal beskrives.

Det skal prosjekteres slik at måling og etterjustering av forspenningskraften i forankringssystemets enkelte elementer kan gjennomføres.

Alle elementer i forankringssystemet skal korrosjonsbeskyttes. Kabler skal beskyttes med belegg, eventuelt kombinert med katodisk beskyttelse.

Bunnankere skal utformes slik at de muliggjør utskifting av forankringssystemets enkelte elementer.

Eventuelle bunnankere for brukonstruksjonens forankringssystem kan være gravitasjonsanker, peler, nedborede eller nedpressede forankringer, eller kombinasjoner av slike.

Utforming og dimensjonering av forankringssystemer som har høyt permanent strekk og utsettes for sykliske laster, skal utføres slik at tilfredsstillende sikkerhet mot globalt brudd oppnås. (16)

Det må også tas hensyn til naturlaster, permanent egenlast for rørbru, variabel egenlast for rørbru som man kan se nærmere på i håndbok N400 til vegvesenet. (16)

## 1.9 Kombinert vind og bølgeavskjerming

For å hindre vannsprut i å trenge inn i tunellen velges det å utforme en flytende konstruksjon i bak- og sidekant av tunellen. Denne skal fungere som et hinder for bølger og vind, og roe ned aktiviteten i og på sjøen akkurat dette området. Konstruksjonen skal bestå av betong, og det tenkes at den kan kombineres med pongtonger tilknyttet rørbruen. Det antas at betongen skal ha en høyde på to meter over vann, samt to meter under, i tillegg vil det fremkomme et rekkverk av betong for sikkerhetens skyld.

Konstruksjonen vil ha bueform hvor begge utstikkerne peker inn mot midten, og danner et basseng i bakkant av innkjørsel til rørbro. Aktiviteten i bassenget blir redusert som følge av bølgedemperne og problematikken rundt vannsprut blir redusert.

Målet er at konstruksjonens design skal være av så høy estetisk klasse at den fungerer som attraksjon for de som krysser bruen til fots eller på sykkel. Alternativt kan det utformes et stoppested hvor man kan betrakte den vakre Trondheimsfjorden. I et ellers fint naturlandskap ønskes det at tunellen skal bringe frem positive assosiasjoner og ivaretar estetikken i nærområdet.

### 1.9.1 Autonombåt

For å lage et alternativ til dem som ønsker å krysse fjorden til fots eller på sykkel er tanken å legge til rette for autonom båt. Det kan tenkes at kaien blir i forbindelse med bølgeavskjermings-konstruksjonen, men det blir ikke tatt

For å sikre at de som ønsker å krysse broen til fots eller på sykkel, er tanken å tilrettelegge for at det skal gå autonom båt som alternativ. På grunn av manglende sykkelsti i rørbruen, på grunn av sikkerhetsmessige årsaker er dette et alternativ vi velger å gå for. Det kan tenkes at av og på stigning vil forekomme på vind og bølgeavskjermings-konstruksjonen. Det går ikke mer detaljert inn på dette.

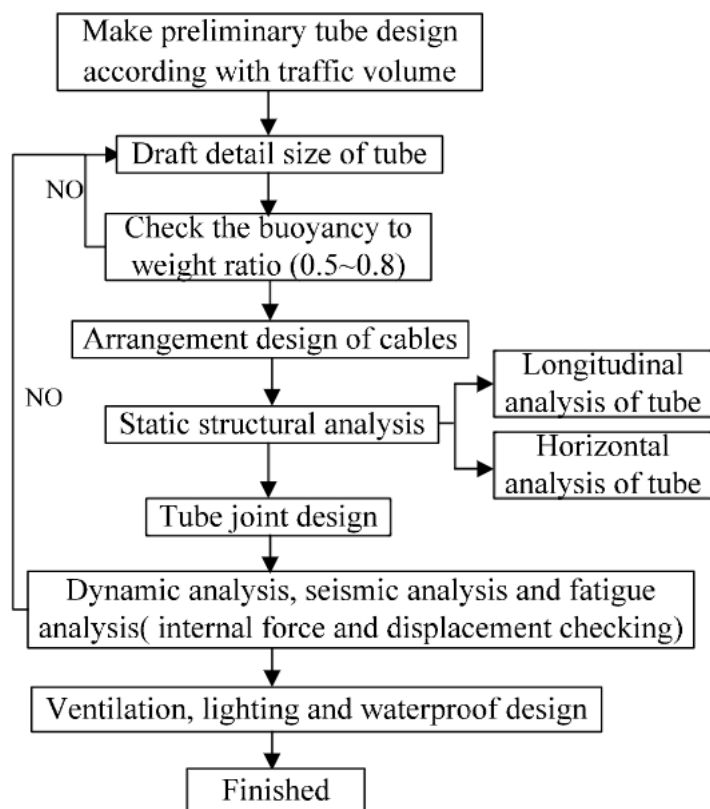


## 1.10 Rørbru.

### Røret.

Designet av "røret" i en rørbru er viktig, Zang K, Xiang Y og Du Y sier at røret i rørtunnelen bør designes etter prinsippene om at den skal ha en lett negative oppdrift (oppdrift/vekt  $<1$ ), at røret må ha en konstruksjonsmessig karakter som gjør at det imøtekommer de krav som oppstår til stivhet, styrke og stabilitet under både bygging og bruk, overflaten bør ha en jevn krumning for å unngå ekstra hydrodynamiske krefter og den bør imøtekomme standard for jordskjelvmotstand (16).

De har også laget et flytdiagram for hvordan man kan gå frem for å designe røret i en rørtunnel. De konkluderer med at vi først må finne behovet vi skal dekke for trafikk tetthet og legge dette til grunn for designen av røret. Når dette er gjort er det viktig at røret får rett vekt, dette for å minske problematikken med egenlast og generelt redusere lastpåvirkningen til røret. Etter at disse hovedkriteriene er fylt må



Bilde 19: Flytskjema for design av rørbru (16)

det designes et nett for kabler og teknisk anlegg, blant annet elektrisk og ventilasjon. Rørdelene må beregnes både for krefter som virker langs rørkonstruksjonen og på tvers av rørkonstruksjonen. Vi må også velge hvilken type ledd vi vil ha mellom rørdelene. Det er både stive og fleksible ledd. Valget av ledd vil ha påvirkning på hvordan krefter vil spre seg i konstruksjonen, ulike former for ledd kan være egnet til ulike formål.

Når vi har valgt ledd kan vi se på hvordan de dynamiske kreftene som feks strømminger og tidevannsforskjeller vil påvirke konstruksjonen. Til slutt mener de at det bare gjenstår å vanntette, ventilere og sørge for lys.

Gruppen ser at det ikke er tatt hensyn til evakuering men anser at dette er noe det må tas hensyn til helt fra starten av rørdesignet.

Helstøpt eller helstøpt og stålledd.

Et av de første valgene vi må ta når vi skal bygge et rør til en rørbru er om vi skal bruke en teknologi som bygger på at røret skal være stålledd betong eller en rent støpt betong rør. De ulike konseptene har ulike for og bakdeler. Et stålledd betongrør vil være dyrere men være raskere i produksjon, samtidig som vanntettheten vil være avhengig av sveisekvalitet og sammenføyingskvaliteter alene, mens et støpt betongrør vil ha flere betongteknologiske utfordringer som må løses (16).

Table 1: Tabell oversatt fra kilde 1.

Egenskap	Støpt betong	Stålledd betong
Pris	Lav	Høy
Tunnelform	Rektangulær er mest utbredt	Sirkulært skall eller sirkulært dobbelt skall
Konstruksjonsmetode	Formstøpt, egen form, tar lang tid	Stålskallet fungerer som form, raskere produksjonstid
Vanntetting	Betongteknologien gir store utfordringer som må løses, både på innsiden og utsiden	Vanntettheten avhenger av sveisekvalitet og kontroll av sveiser, små problemer

Av tabellen over ser vi at artikkelforfatterne mener at det egner seg best å støpe i rektangulære former. Med tanke på hydrodynamiske utfordringer med en rørbru kan det stilles spørsmål ved om dette er egnet. I Norge har vi hatt god suksess med å støpe sirkulære betongkonstruksjoner til havbruk. Utfordringene ved støping av store betongkonstruksjoner med tanke på homogenitet, riss og sprekker kan gjerne spores til

uregelmessige bevegelser i glideforskaling eller endring i størrelse og form på glideforskaling ved for eksempel endring av diameter på konstruksjonen, da spesielt fra en fast diameter og over til en gradvis økende diameter.

Innvendig må man forsøke å utnytte arealet i tverrsnittet på best mulig måte slik at man får plass til de ulike trengte tekniske installasjoner som ventilasjon, brannsikring, lensing, lys og rømning uten å måtte øke diameteren på rørkonstruksjonen mer enn det trafikkbehovet gjør gjellende (16). Når dette er gjort må oppdriften til røret beregnes

Etter at det grove designet er valgt må konstruksjonen last beregnes i følge Zang K, Xiang Y og Du Y må en rørbru dimensjoneres etter:

- Permanente, variable og ulykkes laster
- Permanente
  - o Egenvekt
  - o Oppdrift
  - o Hydrostatisk trykk
  - o Og ulike indre krefter som følge av hydratiseringsreaksjoner i betong
- Variable krefter
  - o Last fra kjøretøy
  - o Krefter fra strømming og bølger
  - o Temperatur laster
  - o Krefter som virker i byggefasen
- Ulykkes laster
  - o Sammenstøt fra skipsforlis ol
  - o Eksplosjoner, i vannet ved tunnelen og inne i tunnelen
  - o Vannlekkasjer.
- Konstruksjonen må også kontrolleres for utmattelses problematikk

Avhengig av støpemetode må konstruksjonen gjøres vanntett, som nevnt over vil dette kreve mer arbeid dersom det velges å støpe konstruksjonen i betong i stedet for å bruke en stålledd betongstruktur. Et betongrør vil ha ulike betongteknologiske utfordringer

og må kles med et vann/lufttett lag på både inn og utside. Mens det stålkledde røret vil avhenge av sveisekontroll. Leddene mellom rørelementene må også vanntettes (16).

## Skjøter mellom rør elementene

For å binde sammen de ulike rørelementene må vi velge en om vi skal bruke stive eller fleksible ledd. For at leddene skal være bra nok til å brukes i en rørtunnel konstruksjon må de møte mange krav og reliabiliteten må være høy (16).

- Det må være mulig å vanntette leddene.
- De må være vedlikeholdsfrie etter montering
- De må effektivt overføre krefter i konstruksjonen slik at det ikke oppstår punkter med kritisk høye laster
- De må tåle lasten de utsettes for under byggefasen og montering.

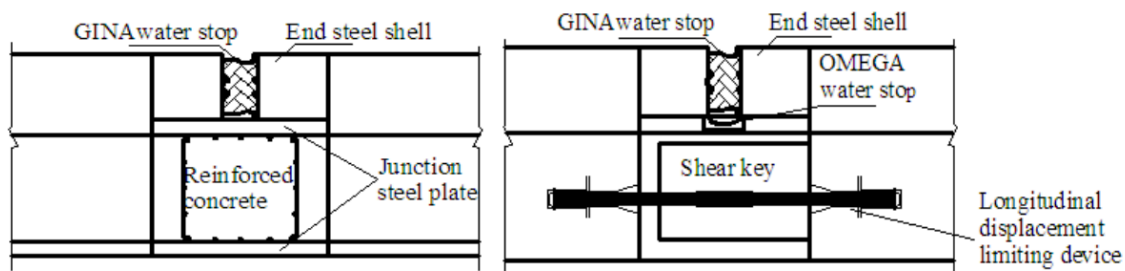
Legg merke til at alle kravene til leddene er "må" krav. I hovedsak kan vi dele inn leddene i to typer, stive og fleksible ledd. Disse har ulike egenskaper, styrker og svakheter. Zang K, Xiang Y og Du Y oppsummerer disse slik:

*Table 2: Ledd egenskaper oversatt fra (1)*

Egenskap	Stive ledd	Fleksible ledd
Konstruksjons-sammensetning	Endeplate i stål, GINA pakning, stålplate til bruk i skjøt og armert betong i skjøten	Endeplate i stål, GINA pakning, Omega pakning, element for å oppta strekkrefter, et system for å forhindre for stor forflytting i lengde retningen.
Deformeringssevne	Dårlig	God
Konstruksjon	Langsomt og komplisert	Grei
Kostnad	Billig	Dyr
Posisjon for bruk	Endestykker	Skjøt mellom moduler

De ulike vurderingene av leddene kan se litt motstridende ut, når konstruksjonen er langsom og komplisert mens produktet blir billig, samtidig som "grei" konstruksjon gir dyrt sluttprodukt kan dette kanskje leses i sammenheng med at artikkelen er skrevet i Kina, der arbeid er "billig", mens materialer er "dyrt". Det er mulig at kostnadene ved noe som er tidskrevende og komplisert å konstruere også vil være dyrt i Norge.

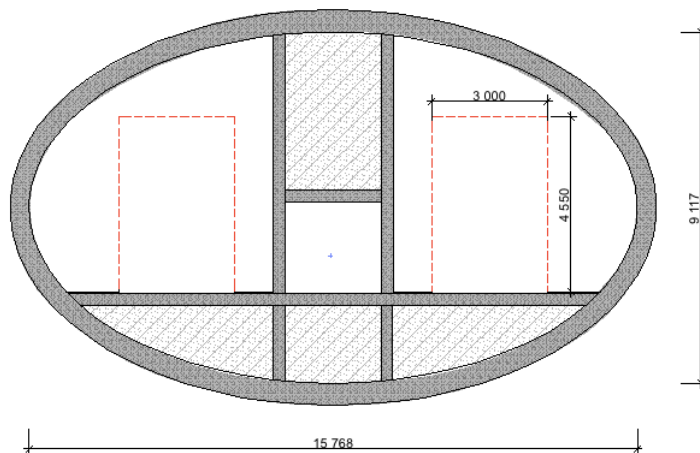
I vår problemstilling skal vi ikke ta hensyn til noen oppledning av endestykker, da vi skal kombinere vår rørbru til en flytendekonstruksjon som også har en egen bevegelse.



Bilde 20: Skjematisk framstilling av stivt ledd til venstre og fleksibelt ledd til venstre (1).

### 1.10.1 Utforming av rør tverrsnittet.

Tunnelen vil ha en liggende ellipseform, med separate kjørefelt og felles rømningsvei. De to kjørefeltene vil være avgrenset av vanntett betongvegger, med en mellomliggende rømningsvei. Rømningsveien skal ha en bredde på 2,5 meter, og være utstyrt med tilfredsstillende ventilasjonsanlegg. Det vil være veiskulder på en meter tilknyttet hvert kjørefelt, og det slik at total bredde er fem meter. Ved å velge en slik utforming tar en høyde for passasje for utrykningskjøretøy dersom det skulle være nødvendig. Det blir også tatt høyde for ventilasjonsanlegg i toppen av røret i tillegg til at de elektriske installasjonene vil plasseres her.



Bilde21: Tverrsnitt av rørbro, med markerte kjørefelt

Hulrommet i underkant av veibanen og i overkant av rømningsvei fylles med masser, som må gjøres for å hindre for stor oppdrift.

Elementene til rørtunnelen støpes i forkant, da den totale lengden vil bli på ca 2700 meter. Siden man operer i en såpass stor skala, er man avhengig av disse blir produsert på forhånd og fraktet til stedet. Elementene blir fylt med betong/pukk ved ankomst, slik at de er lettest mulig under transport. Dette gjøres for å hindre store ødeleggelse, og gjør at transportdelen går mer smertefritt.

### Forutsetninger/utfordringer

Ved en flyebro brukes oppdrift til å bære trafikklaster som påføres broen. En stor utfordring ved å forankre flytebroen i fjorden er de store dybdene.

## 1.10.2 Betong som bygge materiale for en rørbru.

I Norge har vi tradisjon og erfaring med bruk av betong i saltvann. På 1990 tallet var betong utbredt som byggemateriale offshore. Flere av de største oljeproduksjonsplattformene er bygd i betong (Troll A & B, Sleipner, Draugen med flere.)

Erfaringer som er gjort offshore i løpet av 25år tilsier at Betong har god motstandsevne mot korrosjon i den delen av konstruksjonen som er under vann. Under vann er det ikke tilgang til  $O_2$  som kan starte en korrosjon av armeringen og lage en sprenging av betongen. I skvalpesonen (sonen som er vekselvis tørr og våt) og i sonen over vann som er nært vann, eller med andre ord Betongen som er over vann er det derimot funn av rust, bom og forvitring av betong i ulik grad. Graden av skader er sammenfallende med støpe kvalitet og armerings overdekning. Den største påkrevde armerings overdekning ut i fra Eurocode er 17mm (17). Før eventuell konstruksjon av en rørbru vil gruppa anbefale å gjøre en forespørsel på empirisk forskning hos SINTEF. Det er mulig at bygging empiri fra 25 med betong konstruksjoner i Nordsjøen vil gi en korrigering på dette i forbindelse med at konstruksjonen bygges for å ha en varighet på 100 år. Klorid inntrenging i homogen betong med god støpe kvalitet følger et lineært tidsperspektiv og tiden før armerings skade vil være proporsjonal med overdekning.

Betongen som ligger over vannflata eller i skvalpesonen anbefales å være kledd med polymer i sin helhet. Ulike typer herdeplast er nyttet offshore. Dette er i stor del påført i etterkant av byggeprosessen. Sett under ett har dette vært vellykket, men påføring av herdeplast etter at konstruksjonen er lagt ut på plass er kostbart og du blir ikke kvitt de kloridene som allerede er trukket inn i betongen. Slik kan skader fortsette å utvikle seg om det er tilgang på  $O_2$ . Gruppa vil derfor anbefale å påføre betong konstruksjonen i skvalpesonen og over vann et beskyttende lag med polyurea. Polyurea har flere heldige egenskaper, det er raskt å påføre (oppvarmet sprøyte), rask herdetid (6sek), høy



tøyelighet (ca 40mm ved -40°C ved 4mm tykkelse) og det har stor mekanisk slitteevne (brukes som vanntetting i parkeringshus, slidedekke på trailervekter (19).

Det er kjente utfordringer med bruk av betong i salt vann. Sintef gjorde undersøkelser rundt egnetheten til betong i rørbruer allerede på slutten av 1980tallet. De har empiriske data som viser at betong som blir senket ned i saltvann etter 100dager herding vil ha en ekspansjon på ca. 0,1‰. Dette vil føre til en tøyingsforskjell mellom overflaten og den resterende betongmassen. Fordi all betongen vil ha hatt et hydratiseringssvinn, mens overflaten vil svulle opp på grunn av reaksjonene med sjøvannet. Noe som vil føre til at riss viddene blir mindre, størrelsene på disse forskjellene er vanskelige å forutsi. Det er uklart om dette påvirker spenningsforholdene i konstruksjonen. (20) Dette anses ikke å medføre at betong ikke er et egnet byggemateriale for rørbruer

Støping av rørbrua må skje i separate moduler som skjøtes med vanntette skjøter og monteres på stedet før de senkes til rett dyp.

Under produksjon av store massive betongkonstruksjoner er det kjente utfordringer med høye herdetemperaturer som følge av massive støpe tverrsnitt. På grunn av rask fasthetsutvikling og store temperaturforskjeller mellom kjernen og overflaten av betongen kan det oppstå riss. Spesielt i kaldt vær. Riss i støpe skjøter kan være et problem på grunn av at støpe underlaget kan ha mye lavere temperatur enn den herdende betongen. Under produksjonen anbefales det at det tas forhåndsregler for å motvirke store temperatur forskjeller i støypen (21).

I artikkelen til Zang K, Xiang Y og Du Y (16) fremmes det også et forslag om å støpe betongen i stål former og på denne måten få et stålinskapslet betongrør. Da slipper vi unna all problematikk som kan relateres til nedsenkning av betong i vann. Vanntettinga vil da være avhengig av sveisekvalitet og ikke betongteknologiske problemstillinger og herdeplast. Å kle hele røret i stål vil være sterkt fordyrende. For en 2km lang tunnel anses det ikke som veldig relevant.

Et tredje alternativ for vanntetting, dersom man vil unngå vannpåvirkning av hele lengden av betongrøret er å kle hele rørlengden med herdeplast.

Det vil kreves betydelige mengder med betong for å byggen en rørbru. Betongfabrikk anbefales midlertidig anlagt i nærheten av uttak for tilslag, ved Hestgrovheia på Agdenes er det allerede masse uttak fra fjellet og kaianlegg i Lensvika.

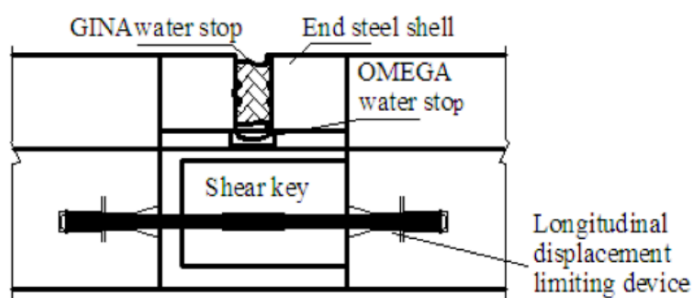
## 1.10.3 Skjøt mellom de ulike rørsegmentene.

Skjøtene mellom de ulike rørsegmentene er kritiske komponenter i konstruksjonen.

Skjøtene mellom rørene må være vanntette og de må overføre krefter i konstruksjonen på en hensiktsmessig måte slik at det ikke oppstår for store lokale utbøyinger.

I artikkelen til Zang K, Xiang Y & Du Y er det skissert et overgangsledd for rørbruer. I vår konstruksjon er det ikke aktuelt å ha momentstive ledd da konstruksjonen vil kunne forskyve seg. Vi må derfor ha fleksible ledd. Figuren under viser en skisse av et mulig et mulig ledd i en rørbru konstruksjon (16).

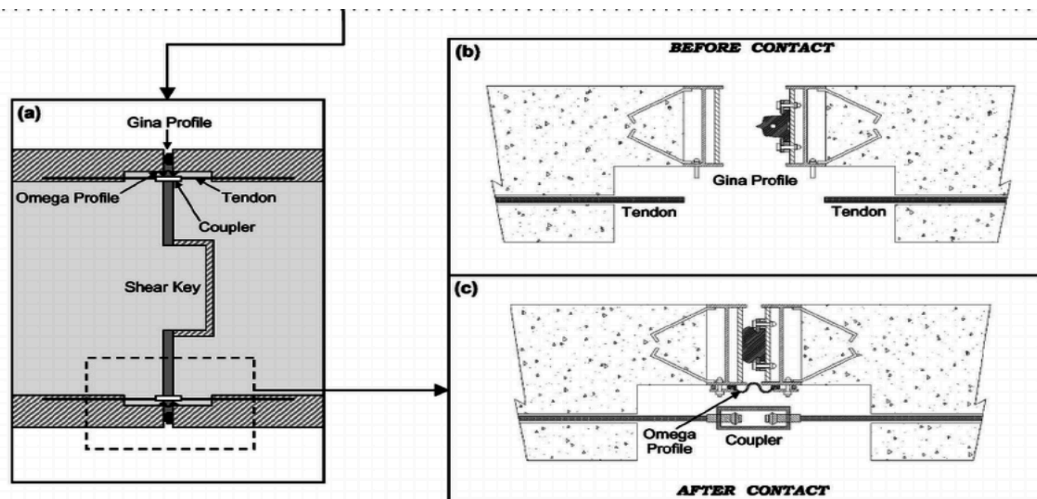
Det er ulike komponenter som må være til stede for at ikke rørbrua skal bli utsatt for krefter som ikke kan opptas i konstruksjonen (16). For opptak av krefter må det være en "shear key" en komponent som tar opp skjærkrefter i leddet men skal ikke gjøre leddet



Bilde 22: Skisse av fleksibelt ledd.

momentstivt. Denne delen skal skal sørge for at ikke rørbru elementene forflytter seg for mye sideveis eller opp og ned i forhold til hverandre slik at vanntettingen blir ødelagt. I leddet er det også en komponente som skal sørge

for å begrense, men muliggjøre noe, forskyvning i lengderetningen. Noen steder er dette kalt for tendon, på grunn av funksjonen, den fordeler krefter i lengderetningen. Uten denne komponenten kan leddet bli dratt fra hverandre og vanntettingen vil også feile. I leddet er det også to tettingspakninger, en GINA og OMEGA pakning GINA pakningen plasseres ytterst i tverrsnittet og OMEGA pakningen innerst (22). De ulike pakningene fungerer på ulik måte. GINA pakningen deformeres og tetter under press (23) mens OMEGA pakningen monteres på begge sider av rørbruleddet som en mansjett (24). Begge pakningene må kunne ta den tiltenkte forskyvningen og deformeringen som kan oppstå i leddet uten at de mister sin evne til å tette for vannet.



Bilde 23: En mer detaljert skisse av leddene i en tog tunnel som går under vann. Her kommer de ulike delene og deres funksjon klart fram (25).

## 1.10.4 Oppankring av en rørbru.

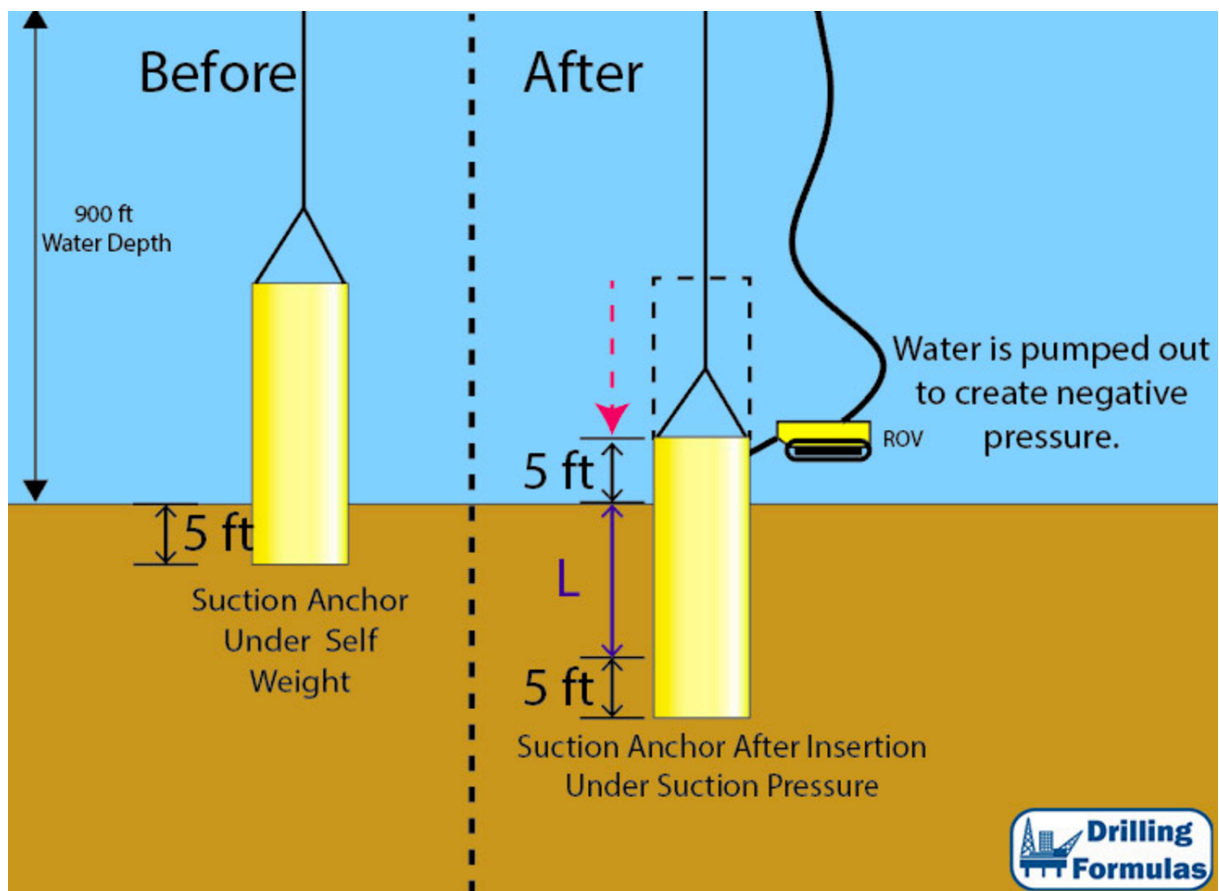
### 1.10.4.1 Sugeanker

Trondheimsfjorden er ca. 500 meter dyp på stedet det er aktuelt å anlegge en rørbru. For å minimere laterale forflytninger og dermed høye strekkspenninger i røret kan vi ankre opp rørbrua mot bunnen.

For å oppankre rørbrua som skal ligge permanent, kan det benyttes sugeanker.

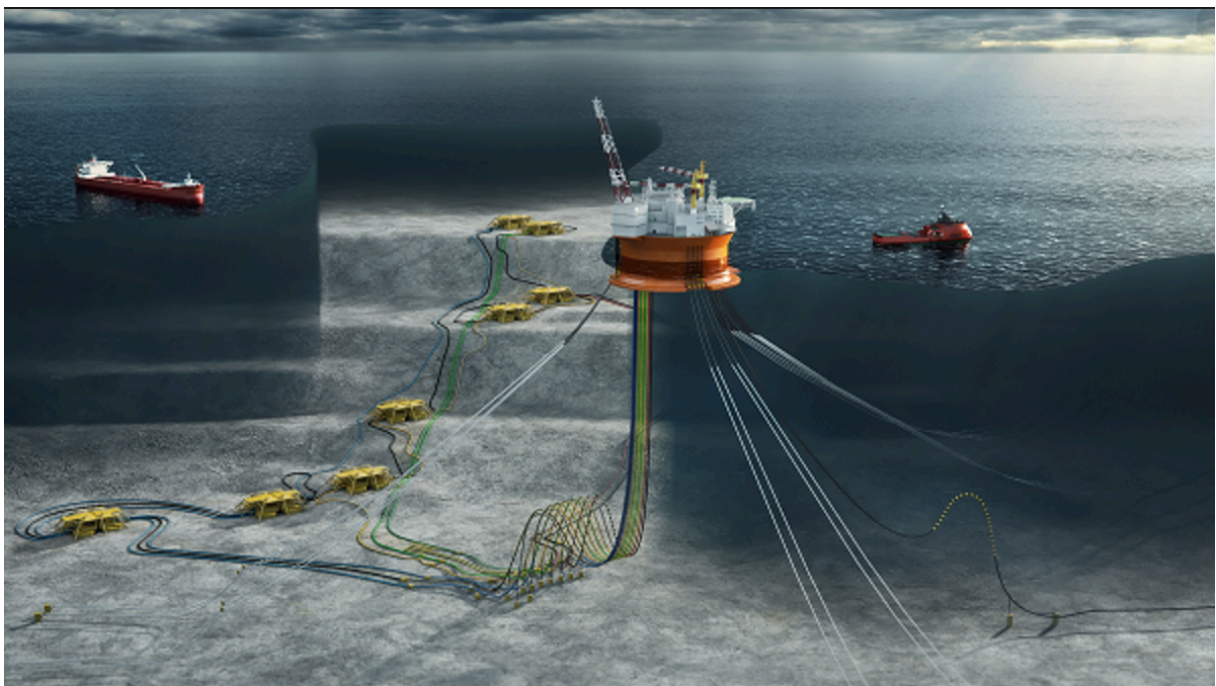
Sugeankere blir i dag ofte benyttet til å ankre opp offshoreinstallasjoner som skal ligge permanent plassert. Et sugeanker er en tynnvegget stålkonstruksjon med åpen bunn.

Ankeret trenger ned i mudd og slam på bunnen, for å få ankeret til å senkes godt ned kan vannet inne i ankeret pumpes ut slik at det suger seg ned i bunnen. Når suge ankeret er plassert holdes det nede av suget og det hydrostatiske trykket på fjordbunnen (25).



Bilde 24: Skjematisk fremstilling av sugeankerets virkning. Ankeret trekkes ned i grunnen og holdes fast av sitt eget sug og av det hydrostatiske trykket på havbunnen.

For å forbinde ankrene til rørbruen legges det ut 2 lengder kjetting langs bunnen (1 lengde = sjø dybden på aktuelt oppankringssted), dette gjøres for å minske bevegelser på sugeankeret, i tillegg til at det vil gi en ekstra oppankringseffekt i form av egen tyngde på kjettingen. I fra sjøbunnen og opp til røret kan det brukes tau, for eksempel kuttsikre kevlartau (26). Dette gir en stor vektbesparing. Vi oppnår da å få vekt langs bunnen der vi vil ha en tung forankring, samtidig som vekten som "henger" i rørbruen og påfører denne krefter vil bli minst mulig.



*Bilde 25: Skjematisk bilde av oppankringen av Goliat, sammenlignbare dybde forhold. Legg merke til vinkelen på ankertauene, mesteparten av visningen tas ut i kjettingen som også utgjør dødvekt på bunnen.*

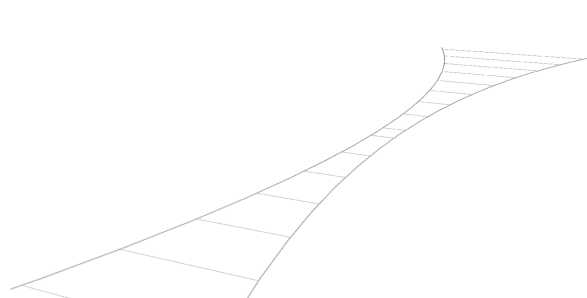
### 1.10.4.2 Kunstig sjøbunn.

Det er blitt utarbeidet prinsippsskisser forankringer av rørbruer som skal krysse dype fjordstrek, der bruene ikke er oppankret mot fjordbunnen. I stedet er strekt opp et sett med "strekstag" mellom de to landsidene brua skal gå til og fra. Brua forankres så ned i dette for å redusere horisontal og vertikal forflytting. På denne måten reduseres antall "ankere" som må brukes for å holde brua på plass.

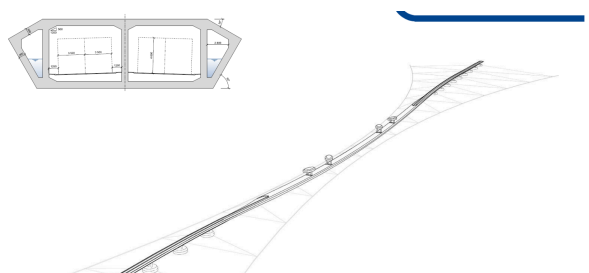
Ved fjord dyp på ca 500 meter vil du spare ca 1500 meter med forankrings forbindelse, kjetting eller tauverk for hvert enkelt suge anker. På en kryssing over trondheimsfjorden på ca 7500 meter vil besparingen bli i området 55 000 meter med forankringsforbindelse og ca 33 suge anker og forankringsjobben med å sette ut disse.

Endestykkene på strekkstagene mures inn i fjellet på hver side av fjorden.

Oppspenningen av den kunstig sjøbunnen vil forme den slik at den får en stor motstand mot horisontal forflytting. Rørbrua vil forankres mot den kunstig sjøbunnen på liknende måte som du forankrer mot havbunnen, men vi vil ikke måtte ha "slakk" i systemet liggende ned på bunnen. Da "slakken" (antall sjakler på grunn) i normal oppankring er for å forhindre rykk bevegelser i ankeret som kan løsne dette. Forankringen mot den kunstige sjøbunnen vil fastholde rørbrua mot horisontal forskyvning. Flytebrua og rørbrua vil forankres i samme kunstige sjøbunn og forskyvningen av de ulike delene vil derfor være forholdsvis homogen, da forankringslengden på ca 30 meter til flytebrua anses å forårsake liten strekk i forankringswirene (27)(28).



Bilde 26: Oppspenning av strekkstagene i både horisontal x og y retning lager en "ramme" som har stor motstand mot forskyvning i horisontalretning.



Bilde 27: Viser flytebrua og rørbrua forankret til den kunstige sjøbunnen. Det vises tydelig hvordan brua blir fastholdt mot større horisontale forskyvninger som ved normal fortøyning når man betrakter den kunstige sjøbunnen som formstiv.

Av skissene for forankringsplanen over kan vi lett se at forankringen mot den kunstige sjøbunnen vil motvirke horisontal forskyvning av flyte og rørbrua.

Fra gruppe 23 fikk gruppa vår innspill om at det blir valgt å bruke kunstig sjøbunn som forankringsmetode for flytebrua og rørbrua



## 1.10.5 Pongtonger

Flyte elementene til en flytebru eller rørbru blir beskrevet med absolutte krav i N400 – Bruprosjektering. (16)

Elementene som blir beskrevet for å sikre kvaliteten på bru og pongtonger er blant annet.

Pkt 13.12.6” Oppdriftslegemer skal seksjoneres for å redusere konsekvensene av utilsiktet vannfylling” (16). Dette tolker gruppen vår dit at alle pongtonger som skal brukes for å holde en flytebru eller rørbru flytende må ha flere enn en seksjon. Og at pongtongen skal ha positiv oppdrift dersom 1 av kamrene i pongtongen blir overfylt med vann. Fylling av vann i en pongtong kammer vil kunne forekomme ved feks en skipskollisjon med pongtongen, da skal pongtongen ennå bidra til positiv oppdrift for konstruksjonen, selv om et” hoved kammer” blir fylt opp av vann.

Pkt 13.12.8.1 (16) omtaler fugene i konstruksjonen. I vår prosjektering av en rørbru kommer vi til å ha fuger mellom pongtongen og en rømningsvei som planlegges opp til pongtongen i tilfelle ulykke i tunnelen som gjør det nødvendig å evakuere denne, men umuliggjør evakuering som følger kjørebanelen, feks ved en brann i brurøret. Standarden beskriver dette enkelt med at det skal være dobbel tetting. Mer om dette i eget avsnitt om tetting av skjøter og overganger.

Pkt 13.12.8.2 (16) omhandler annet utstyr og beskriver at det skal være mulig å entre pongtongene via mannhull i vanntette skott. Dette skal være mulig for å kunne montere pumper i tilfelle lekkasjer sier håndboken. Håndboken beskriver også at gangveiene mellom de ulike rommene i pongtongen skal ligge over den ytre vannstanden.

Det skal også monteres ulike sensorer in i pongtongen. Det skal være mulig å systematisk overvåke konstruksjonens bevegelser og lastrespons, dette kan anses viktig i forbindelse med uvær, dersom pongtongene får en utilsiktet stor hiv kan det være at brua vil være utrygg å kjøre på, dersom det blir målt ekstreme forflytninger i konstruksjonen er det mulig at den må inspiseres før den kan tas i bruk igjen. Det skal

også være mulig å kontinuerlig overvåke armeringskorrosjon og eller annen nedbrytning i flyteelementet. Alarm anlegg for å oppdage og varsle om uvanlig stor vanninntrenging skal også monteres.

Fribordet til pongtongen skal beregnes slik at det er større enn 0. I denne beregningen skal det tas hensyn til ugunstigste kombinasjon av bølger og tidevann med returperiode på 100 år, vannstandsøkning på grunn av klimaendringer skal også tas høyde for. Gruppene i årets prosjekt planlegger et samband som er sideveisforankret, for å ta hensyn til dette må oppdriften til pongtongen settes i forhold til den kraften sideveisforankringen vil trekke pongtongen ned i vannet når pongtongen blir trukket vekk fra forankringen som følge av vind og bølgekraft.

## 1.11 Rømning fra rørbru.

I designet av tverrsnittet av brua har gruppa lagt inn rømningsvei mellom trafikketningene. Kjørefeltene er designet med brede veiskuldre slik at utrykkende ambulanse kan passere alle biler som er tillatte på norske veier.

Rømningsveien bygges separert fra trafikkløpene med vanntette skott, skottene må tåle et vanntrykk tilsvarende nedsenkning til 50 meter. Inn til rømningsveien må det bygges vanntette luker fra trafikkløpene. I lengde retningen av rømningsveien må det designes inn selvlukkende dører for hver 100m som lukker i tilfelle rømningsveien mister integritet og vanninntrenging oppstår.

Evakueringsveien vil følge rørbruene til røråpningen på flytebrua. Det må også være mulig å evakuere opp til pongtongene med trappehus fra rømningsvei. Opp på pongtongene etableres det flåtestasjoner for sjøsetting av flåter som muliggjør rømning til sjø dersom rørbruas integritet er truet av brann, kollisjon eller lignende. Den autonome båten omtalt under bølgeskjerming kan også programmeres til å bistå med redning fra pongtongene ved ulykkestilfeller. Ventilasjons avtrekk i rømningsvei må være korrekt dimensjonert og ha separat drift og ikke bli påvirket dersom ventilasjon i trafikkløpene blir slått av på grunn av ulykke.

## 2.0 Kilder

### 1. Adressa. "Kjører tomme juleferger"

<http://www.adressa.no/nyheter/sortrondelag/article10390760.ece> (1)

1. Wikipedia. "Wolkswagen Transporter". Wikipedia; 06.02.17  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Volkswagen\\_Transporter\\_\(T5\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Volkswagen_Transporter_(T5)) 06.02.17 (2)
2. Multiconsult. LMG Marin "Presentasjon Flytebro med skipspassasje" 03.03.17  
<http://www.multiconsult.no/assets/Flytebro-med-skipspassasje-Harald-Vartdal-LMG.pdf> 25.01.17
3. LMG Marin. "KONSEPTBESKRIVELSE FOR NORDFJORDBRUA FLYTEBRU FOR ANDA – LOTE SAMBANDET"(4)
4. LMG Marin. "Konsept beskrivelse Nordfjordbrua Flytebru for Anda Lote sambandet" 25.01.17.  
<https://eid.kommune.no/Handlers/fh.ashx?Mid1=338&FilId=1070> (5)
5. Statensvegvesen "Rv. 13 Hardangerbrua" 25.01.17  
<http://www.vegvesen.no/Vegprosjekter/Hardangerbrua/>
6. Reinertsen blogg. "Kunstig sjøbunn". 25.01.17.  
<https://reinertsenas.wordpress.com/2013/10/22/kunstig-sjobunn/>
7. Structurae "Lupu bridge". 25.01.17. <https://structurae.net/structures/lupu-bridge> 9.
8. Teknisk ukeblad. Verdens første rørbru kan stå ferdig i 2025. 25.01.17  
<https://www.tu.no/artikler/verdens-forste-rorbru-kan-sta-ferdig-i-2025/275689>
9. Rissa Utvikling. "Orientering til regionsrådet for Trondheimsregionen Februar 2016. 03.03.17. [http://trondheimsregionen.no/wp-content/uploads/2016/01/Trondheimsfjorden-Orientering-til-Trondheimsregionen-12-febr-2016\\_komprimerte-bilder-som-presentert.pdf](http://trondheimsregionen.no/wp-content/uploads/2016/01/Trondheimsfjorden-Orientering-til-Trondheimsregionen-12-febr-2016_komprimerte-bilder-som-presentert.pdf)(12)
10. Statensvegvesen. "Ulykker i Norske tunneller de siste 10 år". 13.02.17.  
<http://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/nyheter/Nasjonalt/ulykker-i-norske-tunneler-siste-ti-%C3%A5r>
11. Statensvegvesen. "Stigning i tunell". 13.02.17.  
<http://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/Handboker/nyheter/stigning-i-tunnel>
12. Allseas. "Allseas". 13.02.17. [www.Allseas.com](http://www.Allseas.com)
13. Statensvegvesen "Håndbok N500 Vegtunneler", Statens Vegvesen, utgitt 2016.
14. Tunnel talk. "Tunnel talk" 22.02.17. [www.tunneltalk.com](http://www.tunneltalk.com)

15. Statens vegvesen. "Bruprosjektering. Prosjektering av bruer ferjekaier og andre bærende konstruksjoner"  
<http://www.vegvesen.no/attachment/865860/binary/1030718>
16. Zang K, Xiang Y & Du Y. "Research on tubular segment design of submerged floating tunnel". Procedia Engineering Elsevier ltd. 2010.08.023
17. Norsk Standard. "NS EN 1992-1-1:2004+NA:2008. Eurocode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner. Del 1-1: Allmene regler og regler for bygninger". 2008
18. Elmico. "Polyurea". 02.03.2017 <http://elmico.no/products/polyurea/>
19. Smedplass s. "Dykket rørbru-Betongteknologi, laboratorieforsøk volumstabilitet". SINTEF FCB Forskningsinstituttet for Cement og Betong. 1990.01.09.
20. Gautefall O, Bjerkeli L & Smedplass S. "Dykket rørbru, Betongteknologiske aspekter" SINTEF FCB Forskningsinstituttet for Cement og Betong. 1987.11.24.
21. Trelleborg. "Trelleborg waterstops". 03.03.17  
<http://www.trelleborg.com/en/engineered-products/products--and--solutions/tunnel--seals/waterstops>
22. Trelleborg. Trelleborg waterstops GINA" 03.03.17.  
<http://www.trelleborg.com/en/engineered-products/products--and--solutions/tunnel--seals/gina--seals>
23. Trelleborg. Trelleborg waterstops OMEGA" 03.03.17.  
[www.trelleborg.com/en/engineered-products/products--and--solutions/tunnel--seals/omega--seals](http://www.trelleborg.com/en/engineered-products/products--and--solutions/tunnel--seals/omega--seals)
24. Braja, Das & Shukla, Sanja K. "Earth Anchors 2nd edition". J. Ross Publishing, Inc. 2013
25. Teknisk Ukeblad "Dette tauet er sterkere enn skuddsikre vester"  
<https://www.tu.no/artikler/dette-tauet-er-sterkere-enn-skuddsikre-vester/234506> 31.01.2017.
26. Reinertsen. "Kunstig sjøbunn" 02.03.2017  
[http://www.nordfjordbrua.no/upload/bruker/dokumenter/Reinertsen\\_Ferjefri\\_E39\\_Nordfjordeid\\_090114.pdf](http://www.nordfjordbrua.no/upload/bruker/dokumenter/Reinertsen_Ferjefri_E39_Nordfjordeid_090114.pdf)
27. Teknisk ukeblad. "Oljeteknologi skal gi forankring til nye megabruer"  
<https://www.tu.no/artikler/samferdsel-oljeteknologi-skal-gi-forankring-til-nye-megabruer/233639>